心理科学进展 2022, Vol. 30, No. 10, 2228–2239
Advances in Psychological Science
https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.02228

序列依赖效应——一种全新的“历史效应”*

柳王娟 定险峰 程晓荣 范 炤
(青少年网络心理与行为教育部重点实验室(华中师范大学); 人的发展与心理健康湖北省重点实验室;
华中师范大学心理学院, 武汉 430079)

摘 要 自 2014 年来, 研究者在视觉加工中发现一种全新的历史效应——序列依赖效应(当前刺激加工向先前刺激方向偏移的吸引性加工偏差)。近期研究发现：该效应广泛存在于视觉加工的各个层面(既包括朝向、空间位置、数量等低级特征, 也包括身份、吸引力、美感等高级属性); 其来源极为复杂(包括感觉编码、高级皮层的反馈调节、工作记忆、决策模板、感知与决策的级联等), 反映出不同层次的过往加工痕迹向当前认知的投射。针对该效应的典型特征、影响因素、认知与神经机制, 已涌现大量研究, 同时也存在严重争论, 亟待研究者深入探讨和厘清。

关键词 序列依赖效应, 认知与神经机制, 感知觉, 记忆, 决策
分类号 B842

1 引言

众多研究表明, 过往刺激会对当下刺激的加工产生影响(de Lange et al., 2018; Joos et al., 2020), 这种已逝刺激对当前刺激的影响可被简单称之为“历史效应” (history effect) (Liberman et al., 2014)。过往发现的历史效应, 包含启动效应(Priming effect) (Maljkovic & Nakayama, 1994)、适应效应(Adaptation effect) (Webster, 2012)、顺序效应(Sequential effect) (Lockhead, 2004)等, 都有助于维持视知觉稳定性和敏感性。自 2014 年来, 研究者在视知觉加工中发现一种全新的历史效应——序列依赖效应(Serial dependence effect)。近 8 年来, 相关研究井喷式增长。本文将对近年来有关该效应的典型特征、影响因素、认知与神经机制的研究进展加以阐明, 特别是将重点梳理针对该效应起源的主要解释, 最后将对该领域的若干研究问题提出设想, 并对未来研究进行展望。

收稿日期：2021-08-31
* 国家社会科学基金教育学一般课题“儿童‘体力/认知权衡’能力：心理加工机制及其干预研究” (BBA210036)资助。
通信作者：程晓荣, E-mail: x.cheng@ccnu.edu.cn;
范炤, E-mail: z.fan@ccnu.edu.cn

序列依赖效应, 表现在我们对当前刺激的反应会系统而稳定地偏向于先前刺激(Fischer & Whitney, 2014)。Fischer 和 Whitney (2014)开创性的研究为该效应提供了首个系统、全面、完备的实验证据。在他们的研究中, 被试在每个试次中看到一个朝向随机的光栅, 并被要求通过调整测试刺激来匹配该光栅朝向。匹配报告的错误分布表明, 被试的报告系统地偏向于前一试次中的光栅朝向。例如, 当前一试次中的光栅朝向比当前试次更顺时针时, 被试对当前光栅朝向的判断会比其真实朝向更向顺时针方向偏移——即发生吸引性影响。研究者们发现该效应广泛存在于视觉加工的各个层面：当前刺激的一系列低级特征, 包括朝向(Fischer & Whitney, 2014)、空间位置(Manassi et al., 2018)、数量(Corbett et al., 2011; Fornaciai & Park, 2018b)、时间知觉(Roseboom, 2019)、运动(Alais et al., 2017)、视觉变异(Suárez-Pinilla et al., 2018)、整体平均(ensemble coding) (Manassi et al., 2017)等, 以及一系列高级属性, 包括面孔身份(Liberman et al., 2014)、面孔吸引力(Ho & Newell, 2020; Pegors et al., 2015; Xia et al., 2016)、美感(Kim et al., 2019)、情绪(Liberman et al., 2018)等, 均受到先前刺激的吸引性影响。这表明序列依赖效应可能反映出某种涉及视觉加工各个

方面的视觉处理机制。因此, 研究者推测(Fornaciai & Park, 2020b), 序列依赖效应可能通过认知加工的短期相关性来降低噪音, 是一种有助于视知觉稳定性和连续性加工的适应性机制, 并有助于节约视觉处理的神经资源。

2　序列依赖的典型特征——与其他历史效应的区别

序列依赖效应有不同于以往其他历史效应的鲜明特征。广为人知的启动(priming), 适应(adaptation)和顺序效应(sequential effect), 都显示了先前经验(prior experience)对当前感知和反应的影响; 但是, 下面的实验事实说明, 序列依赖效应是不同于这些效应的全新现象。

首先, 适应研究表明, 先前出现的适应刺激会导致当前刺激加工中对适应刺激特征方向的感知远离(Anstis et al., 1998), 而序列依赖则会使当前刺激与之前的刺激更加相似。其次, 适应的负后效应具备特定的发生条件和典型特征(Thompson & Burr, 2009)——通常需要非常显著的刺激并暴露相对长的时间, 具备空间特异性, 依附于视网膜坐标, 并在很大程度上不受注意力的影响。与适应不同, 序列依赖效应在一系列弱刺激中最强, 具有时间和空间位置调谐特征, 并且高度依赖注意力(Cicchini et al., 2017; Fischer & Whitney, 2014; Fritsche & de Lange, 2019)。再者, 启动效应通常表现在反应时上(Maljkovic & Nakayama, 1994), 并且有助于改善刺激的可分辨性(Sigurdardottir et al., 2008)。与之不同, 序列依赖不会影响反应时, 不会提升感知可分辨性(Liberman et al., 2014)。另外, 启动效应独立于注意, 可以发生在未被意识到的阈下刺激中(Francken et al., 2011)。相反, 序列依赖效应只能发生在被意识到的刺激中(Kim et al., 2020; Rafiei et al., 2021)。最后, 适应和启动效应已被证明在不同的通道中具有普遍性, 并可以跨通道发生(Arrighi et al., 2014)。然而, 就目前的实验证据来说, 序列依赖效应主要出现在视觉通道(其他感觉通道是否出现稳定的序列依赖效应, 还需要更多实验证据的积累), 且不能跨通道发生(Fornaciai & Park, 2019a)。

以上差异并非指启动、适应和序列依赖效应完全不相关, 而是指这些效应之间存在明显的可区分性。至于它们在感知觉加工中所起的互补作用, 则是一个有待进一步研究的课题(Liberman et al., 2016)。实际上, 有很多研究均表明, 吸引性的序列依赖效应和排斥性的适应负后效应可以在一个任务中同时出现(Fischer & Whitney, 2014; Pascucci et al., 2019)。

3　序列依赖的影响因素

已有的研究探讨了影响序列依赖效应的诸多因素, 包括注意调控、刺激特征调控、感觉不确定性调控等。但研究结果并不完全一致, 序列依赖效应的发生条件、影响因素和在不同刺激中的表现尚待进一步探讨。

3.1　序列依赖的注意调控

序列依赖效应的一个重要特征就是其与注意的关系。Fischer 和 Whitney (2014)利用在不同空间位置上环形排列的 Gabor 刺激, 发现空间注意对于序列依赖具有重要影响——当前试次的朝向偏移方向遵循前一试次中被注意到的刺激的朝向, 而不是前一试次中与当前试次空间位置重合, 但未被注意到的刺激的朝向。换句话说, 序列依赖的一个显著特征就是将相邻时刻上注意所覆盖的空间位置上的信息整合起来。另外, Fornaciai 和 Park (2018b)发现, 在同时比较任务中(此时引发序列依赖的诱导刺激与注视点无空间重合), 当被试的注意集中在注视点位置时, 没有出现显著的序列依赖; 而当注意集中在诱导刺激位置时, 则出现序列依赖, 说明序列依赖的发生需要对刺激有较强注意。近期, Kim 等人(2020)利用双眼竞争范式, 发现只有被意识到的刺激, 才能对随后刺激产生吸引性偏移。Rafiei 等人(2021)结合视觉搜索任务与刺激复制任务对序列依赖效应进行研究, 同样发现只有被注意到的刺激才能产生序列依赖效应, 被忽略的刺激则会对后续刺激产生排斥性影响。此外, 有研究者发现注意不仅可以调节序列依赖效应的强度(体现为偏差的大小), 还可以调节其宽度(体现为出现吸引偏差的刺激作用范围) (Fritsche & de Lange, 2019)。注意对序列依赖效应的调控表明, 与视觉适应不同, 序列依赖效应并不局限于视网膜空间位置。这意味着该效应不是或者不仅仅是停留在感知觉水平, 而可能存在某种主动的高水平加工。

由于序列依赖效应不但发生在具体刺激特征

(如朝向)上，也发生在较为复杂的客体对象(如面孔)上，一个有趣的问题是，序列依赖的注意调控到底是对刺激中某些(任务相关)特征的注意，还是对刺激的整体注意——即序列依赖的注意调控到底是发生在特征水平还是客体水平(Liberman et al., 2014; Manassi et al., 2017)。此前，部分研究者推测序列依赖在客体水平上产生(Liberman et al., 2014)。例如，面孔识别中，序列依赖不受视角改变的影响——说明基于面孔的序列依赖效应发生在以客体为中心的表征水平，而不依赖于低水平的刺激特征(Liberman et al., 2014; Turbett et al., 2021)。如果是这样，只要客体在空间上被注意到，那么，对具体刺激特征的注意可能就不是必要条件。然而，Suárez-Pinilla 等人(2018)在研究视觉变异的序列依赖效应时发现，只有在观察者注意并报告先前运动刺激的视觉变异而不是平均朝向的情况下，才会出现基于视觉变异判断的序列依赖效应。Fritsche 和 de Lange (2019)进一步发现，在朝向复制任务中，序列依赖效应受到基于特征的注意的调节。这些证据表明，一定实验情景中，序列依赖可以在特征水平上发生，其必要条件是对于任务相关特征的关注(Fritsche & de Lange, 2019)。总结以上研究，序列依赖的注意调控方式与刺激类型似乎有密切关联。对于朝向、整体视觉变异等低层次刺激特征，注意调控可能发生在特征水平；而对于面孔等高层次复杂对象，注意调控也可以发生在客体水平。

3.2 序列依赖的刺激特征调控

Fischer 和 Whitney 等(2014)利用朝向刺激发现，序列依赖效应随着前后试次刺激朝向差异的增大而增强，在差异为 27.78°时达到最大，并且前后刺激差异与反应偏差(可代表序列依赖效应大小)的关系能够用高斯正态函数的一阶导数加以拟合。然而，当差异更大时，序列依赖效应减小并逐渐消失。后续众多研究(Cicchini et al., 2017; Huffman et al., 2018)也进一步证实，序列依赖效应只发生在一定差异范围内的相似刺激中，当刺激差异很大时，反而会产生类似适应的排斥性负后效应(Alais et al., 2017)。此外，有研究发现，在朝向维度，序列依赖效应在刺激方向上并不等价：相对于水平和垂直方向，倾斜方向造成更大序列依赖效应(Cicchini et al., 2017)，表明序列依赖效应与刺激的方向特征有关。

Huffman 等人(2018)发现，当颜色作为无关特征出现时，不会影响任务相关特征的序列依赖。这个发现进一步补充了上面的观点，即序列依赖并非局限在客体水平，而是可以发生在具体特征水平，并且不受任务无关刺激特征的影响。Fischer 等人(2020)更深入地探索了刺激特征对序列依赖的影响，他们依据工作记忆框架理论(Oberauer & Lin, 2017)，将刺激特征分为内容特征(content features)和背景特征(context features)。其研究结果表明，对于客体对象，只有在与当前任务相关时，背景特征(颜色、序列位置)才对序列依赖产生影响；而空间位置不论是否与任务相关，都会影响序列依赖，表明了空间位置的特殊性。

此外，近期研究还发现，序列依赖效应可以跨刺激格式发生(此时前后刺激的同一特征维度的表现形式出现差异，例如分别以同时或序列呈现方式定义数量维度；Fornaciai & Park, 2019a)，也可以跨不同反应方式发生(此时前后刺激的任务反应方式不同，例如交替使用二种不同的复制方式对前后刺激的朝向进行反应，Cicchini et al., 2017)，却不能跨刺激特征维度发生(即不能在前后刺激的不同特征维度间直接泛化；Togoli et al., 2021)。Togoli 等人的研究使用包含数量和时间两个维度的刺激，不事先提示被试注意哪个维度，而是让两个维度都进入注意编码。其结果表明，序列依赖效应仅发生在相同的刺激维度间。这说明，与可以在刺激特征维度间泛化的适应效应不同(Kohn, 2007)，序列依赖效应具有高度刺激特征选择性。从维持视觉加工稳定性的角度来看，序列依赖效应的高度刺激特征选择性是必要的，因为这可以在平滑感知噪音的同时，减少跨刺激特征维度的过度整合。

3.3 序列依赖的感觉不确定性调控

序列依赖效应还可能受到感觉不确定性的调节(Samaha et al., 2019)。Fornaciai 和 Park (2019a)发现，序列依赖的大小和最小可觉差(JND，代表感知估计的精度)相关。也就是说，在不确定性较高条件下(以较低的精度为指标)，视觉系统可能在很大程度上依赖于过去输入，以消除或改善当前感官的不确定性。Ceylan 等人(2021)也发现，空间频率更低的刺激(感觉不确定性更高)造成更大序列依赖效应。Taubert 等人(2016)使用具备不同稳定性特征(稳定的性别特征和不稳定的表情特

征)的面孔刺激，发现了针对性别特征的吸引性序列依赖效应和针对表情特征的排斥效应。其结果说明刺激间的整合策略(吸引或排斥)与刺激特征本身的稳定性有关。同样, Kok 等人(2017)的研究也表明，面孔吸引力的序列依赖效应受到面孔熟悉度的影响，在陌生面孔中(感知不确定性更高)，序列依赖效应更强。这与 Cicchini 等人(2018)建立的理性观测者模型相契合。根据该模型，序列依赖效应直接受制于刺激的不确定性以及当前和先前刺激的相似性。

4　序列依赖效应的认知与神经机制

目前，此领域最具争议的话题就是序列依赖现象背后的认知与神经机制，特别是该效应的起源。最初，研究者认为与适应一样，序列依赖产生于感知水平(Fischer & Whitney, 2014)。但是，随后研究又出现指向工作记忆(Bliss et al., 2017)或决策水平(Fritsche et al., 2017)的实验证据，并支持序列依赖是一种知觉后(post-perceptual)效应，源于工作记忆的内容干扰或者决策痕迹的遗留。这种知觉/后知觉二分法(perceptual/post-perceptual dichotomy)已经被广泛用于序列依赖效应机制的解释。从刺激输入到感知、记忆再到感知后决策，序列依赖效应的痕迹在各个认知加工阶段都被发现。基于此，研究者提出基于不同加工阶段的解释模型，借以对序列依赖现象的机制加以解读。这些持续性探索，对揭开动态视觉加工背后的机制，对解密视觉通道如何编码、表征刺激和进行决策有着重要意义。

对序列依赖效应的机制，目前有多种相互竞争的主流观点：一种观点认为序列依赖是一种感知觉水平上的效应，发生在感觉信号转变为意识表征之前。具体来讲，先前刺激的感知觉加工扭曲了随后刺激的感觉编码，从而扭曲了视觉刺激的感知觉外观(Cicchini et al., 2014; Fischer & Whitney, 2014; St John-Saaltink et al., 2016)；其次，还有观点认为虽然序列依赖效应作用在当前刺激的感知水平，但这一过程受制于更高水平的神经反馈信号的调节(Fornaciai & Park, 2019b)；另一种观点将序列依赖效应归因于工作记忆中的动态偏差(Bliss et al., 2017; Fritsche et al., 2017)；还有研究者则是认为序列依赖效应源于决策过程。例如，有学者提出“决策模板”理论，认为序列依赖效应源于之前试次所做决策对当前试次决策的影响(Ceylan et al., 2021; Fritsche et al., 2017; Pascucci et al., 2019)；最后，还有学者认为序列依赖效应可能同时存在于多个认知加工阶段，而并非只具有单一加工机制(Pascucci et al., 2019)。下面详述这几种观点的实验证据和彼此的争议所在。

4.1　基于感知的序列依赖——连续场(continuity field)

Fischer 和 Whitney (2014)提出的“连续场” (continuity field)是对序列依赖效应起源的首个理论解释。该解释直接建立在前人对序列依赖时空调谐属性的研究之上。早在 2011 年，有学者就发现了一种类似序列依赖的效应。具体来讲, Corbett 等人(2011)利用 n-back 范式，发现对后续重复刺激的估计显著偏向于先前同一刺激。这种效应的大小随着两次刺激之间的间隔而下降，并且在同一视野区域中更强，暗示这种类似序列依赖的效应具有时间和空间上的调谐性质。Fischer 和 Whitney (2014)进一步利用 Gabor 刺激，为序列依赖的空间调谐性提供了更为系统和全面的实验证据——即序列依赖的幅度随前后刺激间空间位置距离的增加而下降，在位置重合时达到最大。后续众多研究也进一步揭示了序列依赖的时间调谐性——即空间位置固定时，序列依赖随刺激时间间隔的增加而下降(Fritsche et al., 2017)。对于时间调谐性，研究显示之前的 2~3 个试次都可能对当前试次产生吸引影响(Cicchini et al., 2017; Kalm & Norris, 2018)，并且这种时间调谐性能够有效对抗干扰——即便在试次间插入其他任务，该吸引影响依然会越过中间任务而延续到当前任务中(Fritsche et al., 2017)。总结以上研究，序列依赖效应可以延伸到一个较大的时间(10~15 秒)和空间范围内(约 20°视角) (Fischer & Whitney, 2014; Liberman et al., 2014; Manassi et al., 2017)。Fischer 和 Whitney (2014)将序列依赖的时间与空间调谐区域称之为“连续场” (continuity field)，并基于连续场来解释序列依赖效应的起源。根据该理论，连续场是一种随时间增加对空间邻近刺激的表征进行平滑整合的时空调谐算子。在特定的时空范围内(即连续场内)，刺激表征沿空间维度和时间维度发生整合。这种整合的实质就在于，连续场内，先前的感觉输入会改变感觉神经元的缺省编码属性，从而扭曲了当前的感觉编码，导致当前

刺激表征向先前编码方向的漂移——即出现序列依赖。

除了时间空间调谐性，支持序列依赖效应源于感知阶段——即连续场理论的证据还有很多。首先是刺激相似性对于序列依赖的影响。众多证据表明序列依赖在相似的连续刺激中更强。这点能够很好的用感知效应来解释：相似的刺激更容易产生感知整合，进而发生反应偏移。其次，有研究发现，在不需要行为响应时，序列依赖效应依然存在(Fornaciai & Park, 2018a)。特别是，一些研究者通过巧妙的实验设计，对行为反应和感知觉编码加以分离。在排除反应与决策的影响后，研究者发现序列依赖可以单纯基于感知发生——既不论前后试次反应方式的异同(Cicchini et al., 2017; Rafiei et al., 2021)，也不论行为反应发生与否，或是否正确(St John-Saaltink et al., 2016)。此外，值得一提的是，导致序列依赖效应的不是先前的刺激输入本身，而是我们对于先前刺激的感知(St John-Saaltink et al., 2016; Zhang & Alais, 2020)，这进一步反映出感知成分在序列依赖效应中的重要性。

4.2 基于“条件性”感知的序列依赖——高级神经反馈信号的贡献

尽管序列依赖的生成阶段性还在争议中，但不能否认的是，在感知阶段确实存在序列依赖的证据。这些证据有两个可能的指向，一种是序列依赖效应是单纯的发生在感知阶段的过程，这正是连续场理论所描述的；另一种是序列依赖效应虽然最后作用在感知阶段，但这一过程受制于更高水平的神经反馈信号的调节(Fornaciai & Park, 2019b)——即基于感知的序列依赖具有‘条件性’，不能脱离更高水平的反馈信息。

Fornaciai 和 Park (2019b)利用后向掩蔽来抑制高水平加工对早期感知觉的反馈信号。其研究结果表明，这种条件下无法产生序列依赖效应。这说明序列依赖效应不但需要视觉感知，还需要来自大脑高级区域对视觉感知的反馈信号(Fornaciai & Park, 2019b)。对此，Cicchini.等人(2021)最新的研究成果从另一个角度给出证据。他们发现：序列依赖效应源于先前刺激的高级表征结果以反馈方式作用到当前刺激的早期(而非晚期)感觉加工阶段。换句话说，前一个刺激的知觉后高水平加工过程影响了当前刺激的早期知觉加工。目前，研究者尚无法就序列依赖到底是基于‘纯粹’感知还是‘条件性’感知得出清晰结论。但是，一个值得注意的研究动向是：基于‘条件性’感知的序列依赖实际上将序列依赖效应的起源问题进一步分解为两个方面——分别对应不同认知加工阶段的效应来源(source)和效应作用点(the site of action)。这个最新的思路实际上提出了对序列依赖效应的加工机制进行说明的一种更为精细的方法——即序列依赖起始于前一刺激的知觉阶段还是知觉后阶段，以及它是在早期还是在晚期影响当前刺激的加工。

4.3 基于感知后(post-perceptual)加工的序列依赖

近年来，越来越多无法用“感知觉效应”解释的序列依赖特征不断涌现。首先，吸引性序列依赖受到基于特征的注意调节(Fritsche & de Lange, 2019)，这说明序列依赖不仅是低水平的感知现象。其次，双眼范式的研究表明，序列依赖发生在双眼刺激合并后的阶段(Fornaciai & Park, 2018b; Kim et al., 2020)，而不是早期感知觉阶段。第三，近期实验证据表明，序列依赖不仅仅是一种感知觉效应，而是发生在刺激特征已经被整合过的后期加工阶段。例如，Ceylan 等人(2021)发现，基于朝向的序列依赖效应可以跨越空间频率，甚至跨越刺激类型发生；Fornaciai 和 Park (2019a)发现，基于数量的序列依赖效应可以跨刺激格式发生；而 Liberman 等人(2014)则发现基于面孔身份识别的序列依赖效应可以跨视角发生(说明该效应与低级视觉特征无关，而是作用在更高级的“身份”表征水平)。第四，最新的一些研究则在明确控制决策变量的情况下，发现序列依赖效应需要决策等感知后加工过程的参与，仅仅靠感知编码并不够(Bae & Luck, 2020; Pascucci & Plomp, 2021)。最后，吸引性序列依赖效应与负性排斥效应的共存(Bliss et al., 2017; Czoschke et al., 2019)，以及两者在时空调谐和注意调节上的分离，无法同时被“连续场”理论兼容。以上源于注意调节、双眼竞争、加工整合、决策依赖和排斥效应几方面的实验证据均支持序列依赖源于较高层次的知觉后处理阶段。研究者们陆续发现感知后的工作记忆和决策两阶段在序列依赖中扮演重要角色，并据此相继提出基于工作记忆和基于决策的序列依赖效应的感知后模型。

4.3.1 基于工作记忆偏差的序列依赖

以往许多序列依赖效应的研究中都没有排除

工作记忆的参与。一些研究发现在延长当前刺激和行为反应之间的间隔后, 序列依赖效应也会相应增强。这表明序列依赖效应的作用阶段是晚期认知加工的工作记忆(而不是早期感知觉)。更具体来讲, 工作记忆中的动态偏差可能是序列依赖效应中偏差的潜在来源(Bliss et al., 2017; Fritsche et al., 2017; Papadimitriou et al., 2017)。当响应时间为零——即无工作记忆表征维护条件下, 不但不会发生吸引性序列依赖, 还会出现排斥性负后效应(Bliss et al., 2017)。当然, 利用延长响应时间范式所得结论还有待商榷。Manassi 等人(2018)认为 Bliss 等研究者在延迟时间为零(即立即响应)条件下得到的排斥性负后效应是源于刺激的对比度过高, 目标过于突显。当采用低对比度(4% Michelson 对比度)的光栅刺激重复 Bliss 等人实验后, 得到吸引性序列依赖效应。据此, Manassi 等人(2018)指出该范式中决定历史效应方向和强度的关键因素是亮度对比度(或者更一般的不确定性), 而不是延迟时间本身。

近期的一项研究从另一个角度为序列依赖效应是否基于工作记忆偏差提供了新思路。与传统研究范式不同, Fornaciai 和 Park (2020a)要求被试同时记忆三帧刺激, 并检验记忆干扰是否是生成序列依赖的充分条件。他们发现, 存在完全基于记忆干扰的序列依赖效应, 且该效应是双向的(对于储存在记忆中的一系列刺激, 序列依赖效应不一定是传统的前一个对后一个的影响, 也可能是后面刺激造成前面刺激的加工偏移)。总体来讲, 该研究为基于工作记忆偏差的序列依赖提供了有力的实验证据。

4.3.2 基于决策模板的序列依赖

在近期一项研究中, Ceylan 等人(2021)提出基于决策的序列依赖模型——序列依赖效应是发生在相对高层次的决策阶段的偏差。先前刺激通过改变 “决策”单元的读出(一组权重, 用于从低水平的感觉神经元群体活动中形成最终知觉表征)来影响当前刺激的感觉活动解码。也就是说, 过去知觉决策的痕迹(“决策模板”)会因对先前刺激的决策加工而改变, 从而调节当前刺激的知觉表征。

与“决策模板”理论一致, 当把决策作为变量纳入序列依赖效应的分析后, 研究发现, 对刺激的决策是比刺激本身更为有效的预测因子(Pascucci et al., 2019; St John-Saaltink et al., 2016)。还有一些研究通过巧妙的实验设计和数据分析方法, 将刺激, 决策与行为反应这三因素对序列依赖的贡献分开, 并发现刺激和决策均能产生较为稳定的序列依赖效应(Cicchini et al., 2017; Fründ et al., 2014)。然而, 纯粹来自行为反应的序列依赖并没有得到一致性证实, 甚至有研究发现行为反应实际上产生排斥性负后效应(Zhang & Alais, 2020)。

4.4 基于感知–决策级联的序列依赖

来自不同加工阶段的实验证据令研究者们意识到, 序列依赖效应可能并非一种单一加工机制现象, 也不是某个单一神经过程的副产品, 而更可能源于多个加工阶段, 具有多种成分。Pascucci 等人(2019)提出了基于感知–决策级联的序列依赖理论。该理论强调在早期感知层面会产生类似适应现象的排斥性负后效应, 该排斥效应基于感觉神经元的群集编码; 而在较晚的决策层面则产生吸引性的序列依赖效应, 该吸引效应源于决策模板影响当前刺激的感觉活动解码。这两种效应虽然具有截然不同的功能机制, 作用于不同加工阶段, 但两者依序整合(级联, concatenated), 组成序列依赖效应的一种层级结构(hierarchical structure)。因此, 该理论也被称为序列依赖的双加工模型(Two-process model of serial dependence)。有研究者提出, 序列依赖中的这两个成分可能具有完全不同的功能: 排斥性负后效应专注于感知上的“隔离(Segregation)”, 以帮助视知觉更加敏感地捕捉输入变化、保持客体的感知独立性与细节(Sharp et al., 2019); 相应的吸引性序列依赖效应则专注于通过“整合(Integration)”时间和空间上相近的输入以减少噪声(Cicchini et al., 2017)。

4.5 序列依赖效应的神经机制研究

目前对于序列依赖效应认知加工机制的研究大部分是基于行为实验结果做出的推测。已有的一些理论观点和认知模型需要进一步与来自认知神经科学的实验证据相佐证。近年来, 研究者从序列依赖效应的神经机制角度入手, 为该效应的一些认知模型提供了来自不同加工阶段神经信号的直接证据。

首先, 脑电研究为基于感知的序列依赖效应提供了实验证据。例如, Fornaciai 和 Park (2018a)让被试被动观看数量刺激, 然后分析不同数量刺激引发的视觉诱发电位。其结果表明, 即使在没

有明确任务或任何行为相关性的情况下，先前刺激的数值大小也会以吸引方式系统诱发对当前刺激的偏差。这种影响无法归因于决策过程，只能用知觉水平上的偏差来解释。此外，脑电研究发现，在刺激早期就已经出现受先前刺激影响的大脑电生理反应，表明序列依赖始于知觉加工的初期(Fornaciai & Park, 2018a, 2020b)。同样 St John-Saaltink 等人(2016)在被试进行朝向迫选任务的同时，利用 fMRI 记录视皮层活动模式，并发现在早期感觉表征水平上，存在先前感知所施加的吸引性偏差。

其次，一些研究(Trapp et al., 2021; Pascucci et al., 2019)从神经元突触可塑性(synaptic plasticity)的角度来解释序列依赖效应的神经机制。例如，Pascucci 等人(2019)认为序列依赖双加工模型的神经基础就建立在功能不同的双层神经元网络上：第一层为输入层(input layer)，其中的神经元选择性地对基本视觉属性进行群编码，第二层为读出层(readout layer)，其中的神经元对输入层的信号进行解码。由于两层神经元之间的突触连接(synaptic connections)具有短时程的可塑性(short-term plasticity)以及权重的缓慢衰退性(slowly decaying weights)，导致序列感觉信号解码中出现惯性(inertia)特征——从而带来序列依赖效应。此类序列依赖效应的神经生理基础就是近期事件(包括先前刺激和相关决策)导致的暂时性突触痕迹(temporary synaptic traces)。以上解释与神经电生理研究中决策的突触可塑性解释(Wang, 2008)具有一致性。

此外，一些研究为基于短时记忆/工作记忆干扰的序列依赖提供了认知神经科学的实验证据。Fornaciai 和 Park (2020b)利用“活动−静默(activity-silent)”工作记忆再激活的技术和神经解码分析方法，发现先前试次的神经活动可以在知觉之后被储存并保持相对较长的时间；当前试次的新感觉脉冲会“重新点燃” (“reignite”)处于静默状态的过往神经活动，并以类似“回声” (“echo”)方式作用到当前感觉信息的加工上。Stein 等人(2020)发现两类脑损伤(anti-NMDAR 脑炎和精神分裂症)患者基于工作记忆的序列依赖效应的强度显著小于正常人，尽管他们的工作记忆精度(precision)与常人无异。近期的另一项研究中，de Azevedo Neto 和 Bartels (2021)在没有任何任务的试次间隙对背侧前运动皮层施加经颅磁刺激(TMS)噪音干扰。他们发现，该干扰虽然没有降低前后试次的视觉运动表现，却显著降低了试次间序列依赖效应的大小。这表明，在此研究所使用的视觉运动任务中，前运动区参与将先前试次信息转入记忆模块，且被存储的先前试次信息是序列依赖效应的重要来源。总之，以上研究均提示序列依赖效应与短时记忆/工作记忆具有密切联系。

5 序列依赖效应的适应意义和数学模型研究

由于头部和眼睛的移动、物体遮挡、光线变化等因素，视觉输入通常是嘈杂、动态和不稳定的，但我们的主观视觉感知却能够保持不间断的稳定性。从被提出起，序列依赖效应就被认为代表了一种实现视觉加工稳定性的机制，该机制通过沿时间维度整合视觉输入来促进稳定性(Cicchini et al., 2014; Fischer & Whitney, 2014)。尽管有关序列依赖加工机制的具体理论解释众说纷纭，但不论序列依赖到底起源于感知觉还是知觉后的记忆或决策阶段，其最后导致的行为结果——即连续刺激间的偏移性影响，的确能够保持视觉加工的稳定性和连续性。这种稳定性和连续性也使得序列依赖效应与其他视觉加工过程建立直接关联。例如，有研究表明，当视野存在对客体的遮挡物时，序列依赖效应有助于提升运动刺激加工中的客体稳定性和连贯性(Liberman et al., 2016)。面孔相关的研究也证明序列依赖效应有助于被试的身份识别能力(Turbett et al., 2019)和情绪感知能力(Mei et al., 2019)。从进化的角度来看，序列依赖效应的功能是适应外界环境所需的。各个时刻的视觉输入通常非常相似(Liberman et al., 2016)，而自然视觉统计数据以缓慢变化的成分为主(Ruderman & Bialek, 1994)。因此，结合当前刺激感知与历史刺激感知的加权平均能有效减弱感官输入中的噪音成分，以维持感知的稳定性和节约认知加工资源。

近年来，有研究者从数学模型的角度对序列依赖效应的适应意义(包括平滑视觉噪音、节约感知觉资源、甚至加快反应)加以研究。例如，Kalm 和 Norris (2018)和 Cicchini 等人(2017, 2018)利用贝叶斯模型来对序列依赖效应进行数学建模。根据贝叶斯模型，观察者借助整合当前感觉输入和长期生活经验获得的先验知识(prior knowledge)来不

断修正对视觉输入变化的预测。Kalm 和 Norris (2018)通过对心理物理实验数据的模型拟合验证了先验知识的重要性。他们发现, 相比较只考虑当前数据的过滤器模型或结合了单一先前试次刺激与当前数据的自然先验模型, 包含了多个先前试次刺激信息的混合模型最符合序列依赖效应的各个特征。Cicchini 等人(2017, 2018)利用理想观测者模型("ideal-observer model")对实验数据进行建模, 发现过去信息的权重随着平均刺激的感觉噪声而增加, 并且与过去和当前刺激之间的差异成反比。以上建立在贝叶斯数学模型基础上的发现与"预测编码" (predictive coding)理论(Huang & Rao, 2011)相契合。根据"预测编码"理论, 在每一个神经阶段都存在上一个刺激编码(作为先验经验)对下一个刺激编码产生"预测性"影响, 而神经响应最终所反映出来的是多个阶段共同作用的综合结果(Huang & Rao, 2011)。因此, "预测编码"理论有可能为反映在多个认知加工阶段上的序列依赖效应的数学模型研究提供进一步拓展思路(Cicchini et al., 2021)。此外, Cicchini 等人(2018)的数学模型研究预测, 当序列依赖增强时, 不但刺激复制任务的误差降低, 反应时间也应该变快。不过, 序列依赖中的反应加快并没有被大多数实验研究捕捉到, 具体原因还需进一步探究。

6 总结和展望

综上所述, 序列依赖效应的研究已经取得了诸多进展: 研究者们已经在视觉加工的各个层面(既包括朝向、空间位置、数量等低级特征, 也包括身份、吸引力、美感等高级属性)发现该效应的踪迹。该效应有着不同于以往其他历史效应的鲜明特征, 并受到包括注意调控、刺激特征调控、感觉不确定性调控、时间和空间调谐属性等诸多因素的影响。其来源极为复杂(包括感觉编码、高级皮层的反馈调节、工作记忆、决策模板、感知与决策的级联等), 反映出不同层次的过往加工痕迹向当前认知的投射。然而, 当前关于序列依赖效应的研究仍存在较大可拓展空间, 未来相关研究可在如下几个方向上深入开展。

第一, 多管齐下、合力解决序列依赖效应的起源问题。目前序列依赖效应的起源尚未明确, 在感知、记忆、决策和反应中都存在种种证据, 对这一核心问题的探索依然是未来研究的首要任务。为此, 研究者们可能需要从以下两方面合力做出突破。

一方面, 需要通过实验范式和数据分析方法的创新, 进一步将不同认知加工阶段分离开。典型的知觉研究范式中, 感知、决策和反应通常相互混淆。虽然通过实验控制可以做到一定程度的分离。例如, St John-Saaltink 等人(2016)通过对被试的响应正确率进行滴定, 实现试次中感知和决策的分离; 再如 Cicchini 等人(2017)利用另一种完全不同的方式来达到感知与决策的分离。但是, 这些分离均并不彻底, 往往只分离了其中一种, 或只是试图将某一过程的参与度减少。未来研究需要广泛借鉴和使用其他领域的巧妙方法和成熟研究范式, 借以实现对认知加工阶段的彻底分离和对序列依赖效应起源的探索。近期的一些相关尝试值得注意, 包括 Cicchini 等人(2021)利用视错觉探究序列依赖效应的来源和作用阶段; Rafiei 等人(2021)利用视觉搜索范式实现注意和未被注意刺激效应的分离; 以及两个研究(Fornaciai & Park, 2018b; Kim et al., 2020)通过双眼竞争范式探究序列依赖效应的发生阶段等。

另一方面, 未来研究亟待进一步结合认知神经科学技术, 就序列依赖效应的起源获得关键性实验证据。尽管研究者已经就序列依赖的神经机制获得一些进展, 例如, Fornaciai 和 Park (2018a)借助视觉诱发电位(VEP), St John-Saaltink 等人(2016)借助 fMRI, Papadimitriou 等人(2017)借助细胞电活动记录, 分别研究了了序列依赖背后的神经基础; 然而, 从文献分布角度看, 使用认知神经科学技术探索序列依赖的研究目前所占比例非常小, 绝大多数研究均采用行为和心理物理学方法, 因而不能够就诸如序列依赖效应的起源和不同加工阶段的各自特征等问题给予神经层面的直接证据, 也不能够探讨一些行为实验无法解决的问题, 例如, 序列依赖效应在不同认知加工阶段时间点上的发展与演化轨迹等。

第二, 深入拓展序列依赖效应的影响因素及实现精细化实验操纵。随着有关序列依赖的研究不断增长, 研究者们发现越来越多对该效应产生影响的变量, 除了被较广泛研究的注意、时间空间调谐等, 还包括刺激范围、刺激不确定性、刺激静态和动态特征、被试注意力控制、被试信心等。这些因素如何影响序列依赖效应, 还需要更

加细致的探究, 例如, Collins (2019)在以往研究空间位置调控序列依赖的基础上, 进一步探索出该调控效应是基于视网膜坐标(Retinotopic coordinate, 即刺激投射在视网膜上的相对位置), 而不是基于刺激的外部空间坐标(Spatiotopic coordinate, 即刺激在外部空间的绝对位置)。类似的可扩展问题还包括：序列依赖效应能够泛化到哪些刺激类型中？不同类型刺激的序列依赖效应在时间和空间调谐的范围具体多大？刺激在多大的差异下会由序列依赖效应转为短时程的排斥性适应效应？客体注意和特征注意对序列依赖效应的影响具有哪些共性和差异等？

第三, 进一步探索序列依赖效应的个体差异问题。先前研究就序列依赖是否存在个体差异得到不一致的结果, 部分知觉决策(perceptual decision)的研究观察到存在于序列依赖效应的强度、广度甚至是方向上的显著个体差存(Braun et al., 2018; Fründ et al., 2014); 而其他研究则在被试间发现较为一致的结果(Fischer & Whitney, 2014)。如果这些研究中个体差异的来源是实验控制, 这就意味着, 未来研究中, 研究者必须在实验控制上更加谨慎。需要精细控制目前已知的调控序列依赖效应的各种变量(例如, 空间坐标系选择、刺激对比度、刺激空间位置差异等), 并需要考虑更多未知的影响因素。另一方面, 如果个体差异的来源不限于实验控制, 那么, 个体差异的研究也可以为我们深入了解序列依赖效应的机制与功能打开了一扇窗口。例如, 有研究在个体水平发现, 基于面孔身份识别的序列依赖效应的大小与个体的面孔身份识别能力之间存在显著相关, 表明序列依赖效应广泛参与了对人类面孔的编码与再认(Turbett et al., 2019; Turbett et al., 2021)。

第四, 高度重视序列依赖效应对心理实验设计的影响。从方法学角度看, 序列依赖的发现给我们带来了如下的冲击和启示：未来任何涉及到连续刺激的心理实验设计, 都不得不考虑前后刺激间可能存在的序列依赖的潜在影响。这里前后刺激的时间跨度非常广泛, 既可能是在同一试次内的几百毫秒水平(Fornaciai & Park, 2019a); 也可能是在相邻试次间的几秒水平(Ceylan et al., 2021)。因此, 一方面, 在未来实验范式的设计和实验结果的讨论中, 研究者将不得不把序列依赖列为一个可以和启动、适应等因素并列的, 可能影响实验效度和实验结果解释的重要变量, 并实施相应的实验控制和必要讨论。另一方面, 鉴于序列依赖广泛存在于视觉加工的各个层面(从朝向、空间位置、数量等低级特征到身份、吸引力、美感等高级属性), 在过往涉及连续刺激加工的大量心理学范式(例如, 涉及连续呈现刺激的审美判断、面孔识别、数量识别和算术运算等的研究)中, 序列依赖效应是否存在, 如存在扮演何种角色等, 都值得研究者重新思考和开展必要回溯研究。

参考文献

Alais, D., Leung, J., & van der Burg, E. (2017). Linear summation of repulsive and attractive serial dependencies: Orientation and motion dependencies sum in motion perception. *Journal of Neuroscience*, *37*(16), 4381−4390.

Anstis, S., Verstraten, F. A., & Mather, G. (1998). The motion aftereffect. *Trends in Cognitive Sciences*, *2*(3), 111−117.

Arrighi, R., Togoli, I., & Burr, D. C. (2014). A generalized sense of number. *Proceedings Biological Sciences*, *281*(1797).

Bae, G. Y., & Luck, S. J. (2020). Serial dependence in vision: Merely encoding the previous-trial target is not enough. *Psychonomic Bulletin & Review*, *27*(2), 293−300.

Bliss, D. P., Sun, J. J., & D'Esposito, M. (2017). Serial dependence is absent at the time of perception but increases in visual working memory. *Scientific Reports*, *7*(1), 14739.

Braun, A., Urai, A. E., & Donner, T. H. (2018). Adaptive history biases result from confidence-weighted accumulation of past choices. *The Journal of Neuroscience*, *38*(10), 2418−2429.

Ceylan, G., Herzog, M. H., & Pascucci, D. (2021). Serial dependence does not originate from low-level visual processing. *Cognition*, *212*, 104709.

Cicchini, G. M., Anobile, G., & Burr, D. C. (2014). Compressive mapping of number to space reflects dynamic encoding mechanisms, not static logarithmic transform. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *111*(21), 7867−7872.

Cicchini, G. M., Benedetto, A., & Burr, D. C. (2021). Perceptual history propagates down to early levels of sensory analysis. *Current Biology*, *31*(6), 1245−1250.e2.

Cicchini, G. M., Mikellidou, K., & Burr, D. (2017). Serial dependencies act directly on perception. *Journal of Vision*, *17*(14), 6.

Cicchini, G. M., Mikellidou, K., & Burr, D. C. (2018). The functional role of serial dependence. *Proceedings Biological Sciences*, *285*(1890), 20181722.

Collins, T. (2019). The perceptual continuity field is retinotopic. *Scientific Reports*, *9*(1), 18841.

Corbett, J. E., Fischer, J., & Whitney, D. (2011). Facilitating stable representations: Serial dependence in vision. *PLoS One, 6*(1), e16701.

Czoschke, S., Fischer, C., Beitner, J., Kaiser, J., & Bledowski, C. (2019). Two types of serial dependence in visual working memory. *British Journal of Psychology*, *110*(2), 256−267.

de Azevedo Neto, R. M., & Bartels, A. (2021). Disrupting short-term memory maintenance in premotor cortex affects serial dependence in visuomotor integration. *Journal of Neuroscience, 41*(45), 9392−9402.

de Lange, F. P., Heilbron, M., & Kok, P. (2018). How do expectations shape perception? *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(9), 764−779.

Fischer, C., Czoschke, S., Peters, B., Rahm, B., Kaiser, J., & Bledowski, C. (2020). Context information supports serial dependence of multiple visual objects across memory episodes. *Nature Communications*, *11*(1), 1932.

Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in visual perception. *Nature Neuroscience, 17*(5), 738−743.

Fornaciai, M., & Park, J. (2018a). Attractive serial dependence in the absence of an explicit task. *Psychological Science*, *29*(3), 437−446.

Fornaciai, M., & Park, J. (2018b). Serial dependence in numerosity perception. *Journal of Vision*, *18*(9), 15.

Fornaciai, M., & Park, J. (2019a). Serial dependence generalizes across different stimulus formats, but not different sensory modalities. *Vision Research*, *160*, 108−115.

Fornaciai, M., & Park, J. (2019b). Spontaneous repulsive adaptation in the absence of attractive serial dependence. *Journal of Vision*, *19*(5), 21.

Fornaciai, M., & Park, J. (2020a). Attractive serial dependence between memorized stimuli. *Cognition*, *200*, 104250.

Fornaciai, M., & Park, J. (2020b). Neural dynamics of serial dependence in numerosity perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *32*(1), 141−154.

Francken, J. C., van Gaal, S., & de Lange, F. P. (2011). Immediate and long-term priming effects are independent of prime awareness. *Consciousness & Cognition*, *20*(4), 1793−1800.

Fritsche, M., & de Lange, F. P. (2019). The role of feature-based attention in visual serial dependence. *Journal of Vision*, *19*(13), 21.

Fritsche, M., Mostert, P., & de Lange, F. P. (2017). Opposite effects of recent history on perception and decision. *Current Biology*, *27*(4), 590−595.

Fründ, I., Wichmann, F. A., & Macke, J. H. (2014). Quantifying the effect of intertrial dependence on perceptual decisions. *Journal of Vision*, *14*(7), 9.

Ho, P. K., & Newell, F. N. (2020). Changes in perceptual category affects serial dependence in judgements of attractiveness. *Visual Cognition*, *28*(10), 557−580.

Huang, Y., & Rao, R. P. N. (2011). Predictive coding. *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science*, *2*(5), 580−593.

Huffman, G., Pratt, J., & Honey, C. J. (2018). Serial dependence transfers between perceptual objects. *BioRxiv: The preprint server for biology*. https://doi.org/10.1101/165399

Joos, E., Giersch, A., Bhatia, K., Heinrich, S. P., Tebartz van Elst, L., & Kornmeier, J. (2020). Using the perceptual past to predict the perceptual future influences the perceived present - A novel ERP paradigm. *PLoS One*, *15*(9), e0237663.

Kalm, K., & Norris, D. (2018). Visual recency bias is explained by a mixture model of internal representations. *Journal of Vision*, *18*(7), 1.

Kim, S., Burr, D., & Alais, D. (2019). Attraction to the recent past in aesthetic judgments: A positive serial dependence for rating artwork. *Journal of Vision*, *19*(12), 19.

Kim, S., Burr, D., Cicchini, G. M., & Alais, D. (2020). Serial dependence in perception requires conscious awareness. *Current Biology*, *30*(6), R257−R258.

Kohn, A. (2007). Visual adaptation: Physiology, mechanisms, and functional benefits. *Journal of Neurophysiology*, *97*(5), 3155−3164.

Kok, R., Taubert, J., van der Burg, E., Rhodes, G., & Alais, D. (2017). Face familiarity promotes stable identity recognition: Exploring face perception using serial dependence. *Royal Society Open Science*, *4*(3), 160685.

Liberman, A., Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in the perception of faces. *Current Biology, 24*(21), 2569−2574.

Liberman, A., Manassi, M., & Whitney, D. (2018). Serial dependence promotes the stability of perceived emotional expression depending on face similarity. *Attention Perception & Psychophysics, 80*(6), 1461−1473.

Liberman, A., Zhang, K., & Whitney, D. (2016). Serial dependence promotes object stability during occlusion. *Journal of Vision*, *16*(15), 16.

Lockhead, G. R. (2004). Absolute judgments are relative: A reinterpretation of some psychophysical ideas. *Review of General Psychology, 8*(4), 265−272.

Maljkovic, V., & Nakayama, K. (1994). Priming of pop-out: I. Role of features. *Memory & Cognition, 22*(6), 657−672.

Manassi, M., Liberman, A., Chaney, W., & Whitney, D. (2017). The perceived stability of scenes: Serial dependence in ensemble representations. *Scientific Reports*, *7*(1), 1971.

Manassi, M., Liberman, A., Kosovicheva, A., Zhang, K., & Whitney, D. (2018). Serial dependence in position occurs at the time of perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, *25*(6), 2245−2253.

Mei, G. X., Chen, S. Y., & Dong, B. (2019). Working

memory maintenance modulates serial dependence effects of perceived emotional expression. *Frontiers in Psychology, 10*, 1610.

Oberauer, K., & Lin, H. Y. (2017). An interference model of visual working memory. *Psychological Review*, *124*(1), 21−59.

Papadimitriou, C., White, R. L., & Snyder, L. H. (2017). Ghosts in the machine II: Neural correlates of memory interference from the previous trial. *Cereb Cortex*, *27*(4), 2513−2527.

Pascucci, D., Mancuso, G., Santandrea, E., Della Libera, C., Plomp, G., & Chelazzi, L. (2019). Laws of concatenated perception: Vision goes for novelty, decisions for perseverance. *Plos Biology*, *17*(3), e3000144.

Pascucci, D., & Plomp, G. (2021). Serial dependence and representational momentum in single-trial perceptual decisions. *Scientific Reports*, *11*(1), 9910.

Pegors, T. K., Mattar, M. G., Bryan, P. B., & Epstein, R. A. (2015). Simultaneous perceptual and response biases on sequential face attractiveness judgments. *Journal of Experimental Psychology General*, *144*(3), 664−673.

Rafiei, M., Hansmann-Roth, S., Whitney, D., Kristjánsson, A., & Chetverikov, A. (2021). Optimizing perception: Attended and ignored stimuli create opposing perceptual biases. *Attention Perception & Psychophysics*, *83*(3), 1230−1239.

Roseboom, W. (2019). Serial dependence in timing perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *45*(1), 100−110.

Ruderman, D. L., & Bialek, W. (1994). Statistics of natural images: Scaling in the woods. *Physical Review Letters*, *73*(6), 814−817.

Samaha, J., Switzky, M., & Postle, B. R. (2019). Confidence boosts serial dependence in orientation estimation. *Journal of Vision*, *19*(4), 25.

Sharp, P., Melcher, D., & Hickey, C. (2019). Different effects of spatial and temporal attention on the integration and segregation of stimuli in time. *Attention Perception & Psychophysics*, *81*(2), 433−441.

Sigurdardottir, H. M., Kristjánsson, A., & Driver, J. (2008). Repetition streaks increase perceptual sensitivity in visual search of brief displays. *Visual Cognition*, *16*(5), 643−658.

Stein, H., Barbosa, J., Rosa-Justicia, M., Prades, L., Morató, A., Galan-Gadea, A., ... Compte, A. (2020). Reduced serial dependence suggests deficits in synaptic potentiation in anti-NMDAR encephalitis and schizophrenia. *Nature Communications*, *11*(1), 4250.

St John-Saaltink, E., Kok, P., Lau, H. C., & de Lange, F. P. (2016). Serial dependence in perceptual decisions is reflected in activity patterns in primary visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, *36*(23), 6186−6192.

Suárez-Pinilla, M., Seth, A. K., & Roseboom, W. (2018). Serial dependence in the perception of visual variance. *Journal of Vision*, *18*(7), 4.

Taubert, J., Alais, D., & Burr, D. (2016). Different coding strategies for the perception of stable and changeable facial attributes. *Scientific Reports*, *6*, 32239.

Thompson, P., & Burr, D. (2009). Visual aftereffects. *Current Biology, 19*(1), R11−14.

Togoli, I., Fedele, M., Fornaciai, M., & Bueti, D. (2021). Serial dependence in time and numerosity perception is dimension-specific. *Journal of Vision*, *21*(5), 6.

Trapp, S., Pascucci, D., & Chelazzi, L. (2021). Predictive brain: Addressing the level of representation by reviewing perceptual hysteresis. *Cortex*, *141*, 535−540.

Turbett, K., Palermo, R., Bell, J., Burton, J., & Jeffery, L. (2019). Individual differences in serial dependence of facial identity are associated with face recognition abilities. *Scientific Reports*, *9*(1), 18020.

Turbett, K., Palermo, R., Bell, J., Hanran-Smith, D. A., & Jeffery, L. (2021). Serial dependence of facial identity reflects high-level face coding. *Vision Research*, *182*, 9−19.

Wang, X. J. (2008). Decision making in recurrent neuronal circuits. *Neuron, 60*, 215e234.

Webster, M. A. (2012). Evolving concepts of sensory adaptation. *F1000 Biology Reports, 4*, 21.

Xia, Y., Leib, A. Y., & Whitney, D. (2016). Serial dependence in the perception of attractiveness. *Journal of Vision*, *16*(15), 28.

Zhang, H., & Alais, D. (2020). Individual difference in serial dependence results from opposite influences of perceptual choices and motor responses. *Journal of Vision*, *20*(8), 2.

Serial dependence effect: A novel "history effect"

LIU Wang-Juan, DING Xian-Feng, CHENG Xiao-Rong, FAN Zhao

(*Key Laboratory of Adolescent Cyberpsychology and Behavior (CCNU), Ministry of Education;*
Key Laboratory of Human Development and Mental Health of Hubei Province; School of Psychology,
Central China Normal University (CCNU), Wuhan 430079, *China*)

Abstract: A novel "History effect", i.e., the Serial Dependence Effect (SDE), was introduced into vision research since 2014. The SDE is an attractive bias in cognitive processing, referring to the phenomenon that the representation of a current stimulus is pulled toward the stimuli presented moments ago. Serial dependence has been observed in many substrates of visual processing, spanning from low-level features, such as orientation, spatial location, and numerosity, to high-level attributes, such as identity, attractiveness, and aesthetic judgment. Recent studies have revealed profound origins for this effect, including sensory coding, feedback regulation of high-level cortex, working memory, decision template, cascade of perception and decision, etc., which reflect projections of recent processing traces to current cognition from different levels. Abundant progress has been made on typical characteristics, modulating factors, cognitive and neural mechanisms, and theoretical explanations of the serial dependence effect. However, there are still many contradictions and ongoing debates that need to be explored and clarified by future researches.

Key words: serial dependence effect, cognitive and neural mechanisms, perception, memory, decision